

# 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究

——以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡地为例

Primary research on the effect of rainfall on landslide

—take the slope piled by old landslide in Jiangjiagou valley as example

胡明鉴, 汪 稔, 张平仓

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 降雨对滑坡的激发作用是个广泛讨论的话题。从决定滑坡稳定性的物质条件、结构条件和影响滑坡稳定性的环境条件及雨强、降雨量、降雨入渗、土体力学性质改变等多个方面阐述降雨对滑坡的作用过程。并进行大型的野外人工降雨激发滑坡试验和室内土工试验, 试验结果表明粘聚力和内摩擦角与含水率呈线性递减关系; 降雨激发滑坡是在以降雨为主导因素的多种因素综合作用下发生的复杂过程。

**关键词:** 降雨; 滑坡; 含水率; 力学性质; 线性

**中图分类号:** TU 14; TU 413.6<sup>+2</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2001)04-0454-04

**作者简介:** 胡明鉴, 男, 1974年生。硕士研究生, 现在中国科学院武汉岩土力学研究所从事土力学和岩土工程方面的工作。

HU Ming-jian, WANG Ren, ZHANG Ping-cang

(Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The effect of rainfall on landslide is a widely discussed topic. This paper expatiates the process of the action between the rainfall and landslide from some aspects such as the substance conditions and structure conditions that determine the stability, environmental conditions that affect the stability, rainfall, rainfall infiltration, rainfall density, and the variation of mechanical properties of soil, etc. We have accomplished the large scale field test of landslide inspired by artificial rainfall and laboratory soil test. The test results illustrate that there is a linearly descending relationship of the cohesion and angle of internal friction with the water content. The landslide inspired by rainfall mainly and other factors is a complex process.

**Key words:** rainfall; landslide; water content; mechanics character; linearity

## 1 前言

降雨滑坡是在降雨和渗透作用下, 斜坡平衡遭受破坏而向下滑动的现象<sup>[1]</sup>, 包括缓慢长期的斜坡变形和突然急剧的暴发过程。斜坡的稳定性由斜坡本身的物质成分、结构条件等因素决定, 受环境条件如降雨、地震、人类活动等影响<sup>[2]</sup>。位于云南省东北部金沙江支流小江河谷右岸的蒋家沟, 相当一部分滑坡是在老滑坡的基础上, 经后期条件如坡脚流水切割、降雨入渗等激发而再次发生规模不等、形式不一的滑动。降雨是激发滑坡最主要, 也是最活跃的因素。

## 2 流域内物质成分和气候

(1) 斜坡本身的物质成分和结构构造是决定斜坡稳定性的内在因素。在滑坡频繁发生的区域, 一定能发现容易产生滑坡的相关地层和岩组, 滑坡的分布也严格地被局限于该类地层或岩组分布的范围内<sup>[3]</sup>。深大断裂带、各种节理面和断层面、沉积界面等也是造成滑坡的原因, 包括发生滑坡的地形条件如有效临空面、坡向坡度等。蒋家沟地区大量出露灰黑和灰绿色

薄质板岩, 尤其在沟底, 几乎全由该地层组成<sup>[4]</sup>。板岩层理清楚, 褶皱强烈, 节理裂隙发育; 破碎的岩体极易风化剥落形成细小的岩石碎屑, 这些岩石碎屑常常形成坡度 $35^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 甚至直立的斜坡<sup>[4]</sup>, 这些斜坡极不稳定, 每逢降雨、地震时滑坡崩塌便大规模发生。

(2) 蒋家沟流域由于受季风影响, 干湿季节分明, 全年降雨量多集中在雨季, 夏秋两季(5~10月份)降雨量占全年的80%以上, 其中6~8月份降雨量最为集中, 占全年降雨量的50%以上。据资料统计, 降雨集中期常是滑坡泥石流暴发的高潮期。流域内平均每年发生泥石流12~20次, 都是在5~10月间发生的, 其中约有70%的滑坡泥石流是在6~8月份发生的<sup>[4]</sup>, 而在11~4月几乎没有滑坡泥石流发生。从1965年到1985年间共发生泥石流260多次, 平均每年10多次, 最多的一年达28次<sup>[4]</sup>。

## 3 人工降雨激发滑坡试验

### 3.1 试验场地和降雨设备

在蒋家沟流域滑坡堆积斜坡上选定坡度 $42^{\circ}$ 的试

验场地进行试验。由于基岩埋藏很深且倾角  $62^\circ$  (如图1), 因而滑坡沿基岩面滑动比较困难。试验前对斜坡进行修整和改造: 首先切割坡脚成前缘高差约 1.8 m 的直立临空面, 临空面下部再挖掘形成约 0.7 m 的深沟; 在宽度 7.4 m 斜坡面两边开挖顺沟, 最终形成上宽 3.7 m、下宽 7.4 m、长 7 m 的孤立块体。为使降雨尽可能地入渗, 在块体面上开挖三条水平沟将坡面分成三块(如图2)。中型 3.0 t 的消防车一辆作为降雨的动力设备, 消防车最大水压力 740 kPa, 最大扬程 17.4 m, 最大水平输水距离 360 m。

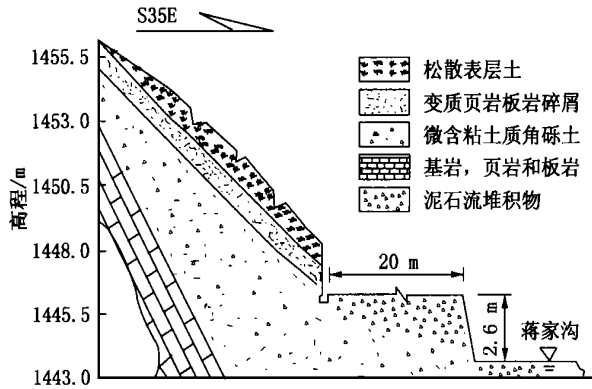


图1 试验斜坡剖面图

Fig. 1 Geological profile of the experimental slope



图2 试验布置图

Fig. 2 The arrangement of the experimental slope

### 3.2 试验前斜坡稳定性研究

为验证降雨滑坡试验的可行性, 首先对斜坡的稳定性进行初步估算。在广泛研究蒋家沟流域滑坡泥石流多种文献<sup>[4, 8]</sup>的基础上, 结合试验开始前所取的两层土土样测定含水率、容重、比重、孔隙度等情况, 选择在表层土平均天然含水率  $w = 6.8\%$  时的粘聚力  $c = 39$  kPa、内摩擦角  $\varphi = 25^\circ$  和第二层土平均天然含水率  $w = 8.4\%$  时的粘聚力  $c = 30$  kPa、内摩擦角  $\varphi = 23^\circ$  的初始条件下搜索斜坡稳定性最小的滑面, 并模拟在雨强 1 mm/min、持续降雨 90 min 的条件下稳定因数的变化。经计算表明: 降雨前本试验斜坡稳定系数  $F_s = 1.21$ , 在降雨条件下  $F_s = 0.96$ , 说明降雨是可以激发该滑坡的。经后来试验结果证明, 这种预先估计和假

设的方法在对斜坡稳定性估算中有很好的价值。计算结果和搜索到的  $F_s$  最小的滑面如图3所示。

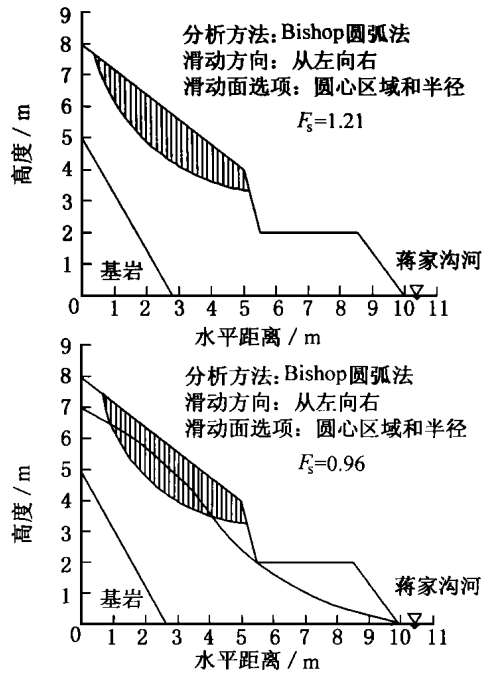


图3 Bishop法搜索到降雨前和降雨后  $F_s$  最小的滑面

Fig. 3 The sliding surface with a minimum  $F_s$  before and after raining searched by method of Bishop

### 3.3 人工降雨滑坡试验过程及典型现象

试验中采用短历时、大雨强的降雨模式, 设计雨强为 0.8~0.9 mm/min。分六个时段进行, 各时段最长历时 25 min, 最短 11 min, 累计降雨 92 min, 累计雨量 94.87 mm; 最大雨强 1.39 mm/min, 最小雨强 0.23 mm/min, 平均雨强 1 mm/min。各降雨时段雨强雨量如图4所示。

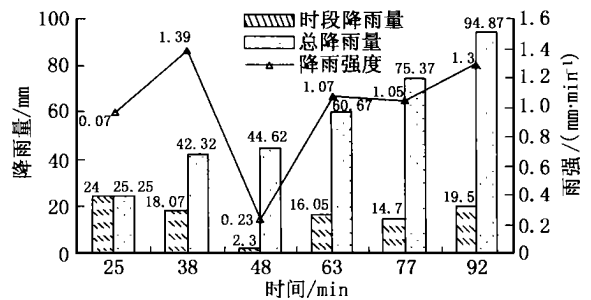


图4 雨强、雨量随时间变化关系

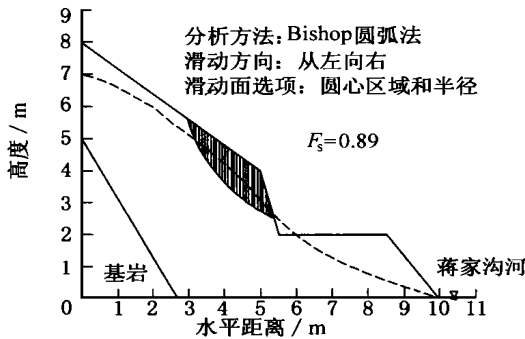
Fig. 4 The relationship between rainfall, rainfall density and time

试验中各降雨时段间隔较长, 雨水有充分的入渗时间, 因此整个过程中没有大的坡面流过程, 降雨入渗很充分。但试验过程中由于受风的影响, 使大雨强、短时集中的人工降雨有时更加集中, 部分坡面雨水来不及入渗而有短暂的产流过程。试验中较多地出现溜滑、崩塌现象。第六场降雨结束时, 坡脚陡壁崩塌, 规

模为 1.1 m×0.8 m×0.5 m, 崩塌发生的时间并不是雨强或时段降雨量最大的时段, 而是在雨量和时段降雨量达到最大之后的一段时间才发生的。崩塌壁中部有大股的层间水流出, 层间水由大变小, 由浊而清, 并冲刷粗粒之间的细粒物质引发小的崩塌。滑坡发生于下部块体左侧临空面上(时间大约在当晚 10 点~次日凌晨 6 点), 滑体上宽 1.9 m、下宽 2.1 m、滑壁后缘坡度 62°, 错距 1.9 m, 有小股清水渗出。块体沿局部隔水层滑动, 滑床坡度 42°, 上有微弱擦痕。在前缘临空面处形成剪出口并沿临空面塌落堆积, 量测滑体体积约 3.8 m<sup>3</sup>, 堆积体表面坡度 37°, 与邻近松散体天然休止角一致。从场地陡立面上可以看到雨水下渗约 0.8~1.0 m, 从在坡面中间取土样时发现雨水下渗约 1.0 m~1.2 m。据滑坡滑动后的滑面反算滑坡的稳定性得到  $F_s = 0.89$ , 与估算值相差 0.07。主要原因可能是所划分的两层土实际上其性质只有细微的差别, 场地中并不存在相对隔水层和相对软弱层, 滑面的整体贯通比较困难。稳定系数即使维持在较低的水平斜坡也可能不滑动。滑坡发生规模、形态和结果如图 5 所示。



(a)



(b)

图 5 滑坡发生后照片及其稳定性

Fig. 5 The photograph and stability calculated after the landslide

## 4 降雨条件下土体力学性质和斜坡稳定性

### 4.1 试验区土体物理性质

试验区土体为原滑坡堆积物, 颗粒松散破碎, 岩屑

成分为变质页岩和板岩碎屑; 粒径 5~20 mm 颗粒含量很高, 含少量粘质土; 结构松散, 粘聚力较弱, 常称为含细粒质角砾土, 简称角砾土<sup>[8]</sup>。根据试验区土体粘土含量和胶结程度的不同, 可将试验区土体分两层: 表层土和第二层土, 其粒径累积曲线图和粒径直方图见图 6、7。

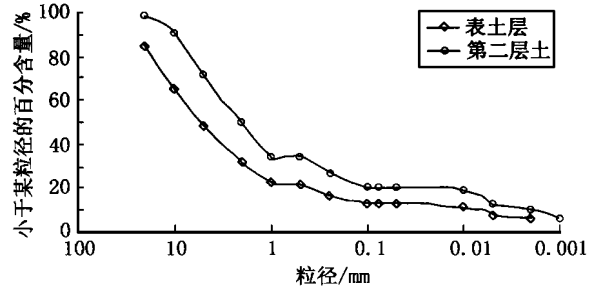


图 6 级配累积曲线

Fig. 6 The cumulative curve of soil in the surface layer

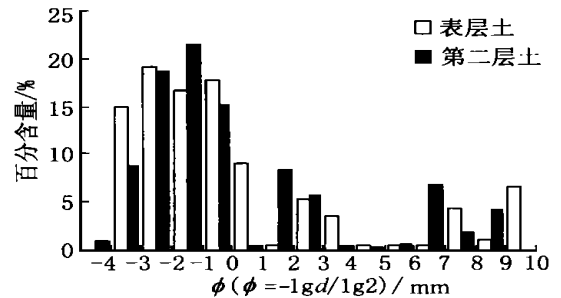


图 7 表层土粒度级配分布

Fig. 7 Gradation of soil in the surface layer

由图可知, 两层土细粒含量相近, 且两种土级配都呈在一定的不连续性。土体其他参数如表 1 所示。

表 1 两层土体部分参数值

Table 1 Some parameters of soil in the two layers

土层	$G_s$	$e$	$w$	$n$	$S_r$	$w_{sat}$	$\rho_w$	$\rho_d$	$\rho_{sat}$
			/(%)				/(g·cm <sup>-3</sup> )		
表层土	2.77	0.07	1.91	0.52	34.00	32.35	1.82	2.16	18.68
第二层土	2.78	0.39	12.24	27.90	87.99	13.91	2.25	2.00	2.28

### 4.2 土体力学性质研究

为说明土体在雨水作用下力学性质的变化, 我们选择表层土和第二层土进行不同含水率下不固结不排水剪试验。试验前将试样置橡皮垫上, 用橡皮锤轻轻锤击, 使土样充分松散, 风干后过 5 mm 筛。为保持试样结构和粗粒含量, 向试样中加入 5~10 mm 的砾石(含量不超过 5%), 并按试验要求配制含水率。试样直径  $\Phi = 61.8$  mm, 高  $h = 150$  mm, 在 100, 200, 300, 400 kPa 的围压下进行试验, 试验结果如图 8、9 所示。

试验表明: 土体内摩擦角和粘聚力与含水率呈线性递减关系。因此在丰富的前期降雨量和临界雨量作用下, 随着雨水不断入渗, 土体含水率增大、土体容重增加、粘聚力和内摩擦角显著降低, 即斜坡下滑力增

加、抗滑力减小, 斜坡稳定因数逐渐降低导致滑坡。

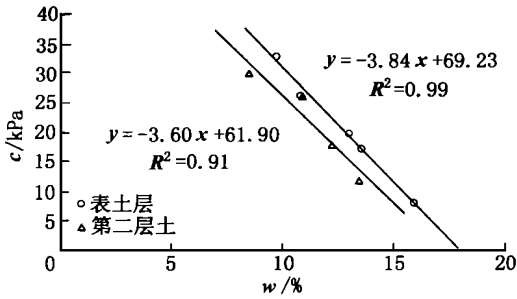


图8 粘聚力随含水率变化关系

Fig. 8 The relation between cohesion and water content

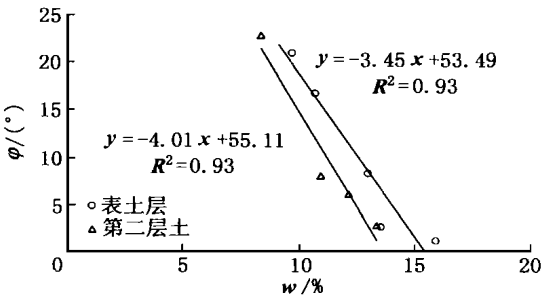


图9 内摩擦角随含水率变化关系

Fig. 9 The relation between angle of internal friction and water content

### 4.3 降雨影响斜坡稳定性分析

将试验结果运用到斜坡稳定性评价中分析稳定系数的变化, 稳定性随含水率和雨强、雨量变化关系如图10所示。斜坡稳定系数随含水率增加而降低, 但变化关系既不是线性的, 也不成反比例的。降低幅度还受雨强和降雨量的影响: 雨强、降雨量越大, 斜坡稳定系数降低幅度越明显。

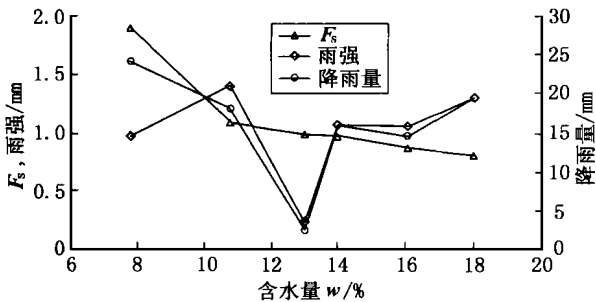


图10 稳定系数  $F_s$  随含水率、雨强和降雨量的变化

Fig. 10 The relationship between  $F_s$  and water content, rainfall and rainfall density

## 5 结论

(1) 蒋家沟流域滑坡泥石流频繁暴发是由流域的物质成分、结构构造、气候等因素所决定的。降雨是流域内滑坡泥石流发生的重要因素。

(2) 降雨滑坡是前期降雨量, 临界雨量共同作用的结果, 前期降雨量和临界雨量也是互相影响的。前期降雨的入渗和水分的运移使土体吸水含水率升高, 土体容重增加和抗剪强度降低, 使斜坡稳定系数降低到一定的水平, 并在一定雨强和降雨量下达到和维持暂态平衡。临界雨量打破这种暂态平衡, 使斜坡平衡遭到破坏。

(3) 降雨激发滑坡是在以降雨为主导因素的多种因素综合作用下发生的复杂的综合过程。在降雨条件下雨水入渗并在土体内运移使土体含水率变大、动静态水压力增加、裂隙充水扩张, 土体抗剪强度降低等, 从而使斜坡稳定系数降低导致滑坡。含水率与粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  值存在线性递减关系, 随着含水率增加, 粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  值降低导致下滑力增加、抗滑力降低, 使斜坡稳定系数降低而发生滑坡。斜坡稳定系数随含水率增加而降低, 但变化关系既不是线性的, 也不成反比例的, 降低幅度还受雨强和降雨量的影响: 雨强、降雨量越大, 斜坡稳定系数降低幅度越明显。

(4) 滑坡并不是在降雨滑坡试验过程中发生, 而是发生在降雨结束后和试验当晚, 说明滑坡的发生呈现一定的滞后性, 滞后于滑坡发生所需的临界雨强和降雨量。因为随着降雨的入渗, 土粒吸水软化、力学性质降低、裂隙扩张、滑面贯通等是渐进过程, 在一定的时间内才能完成。这一观点也为文献[8]所证实。

本文得到中科院东川泥石流观测站基金, 中科院“滑坡泥石流”基础研究及长委水土保持局“长江科技项目”特别支持。

### 参考文献:

- [1] 山田刚二(日本), 等. 滑坡和斜坡崩塌及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(1): 21~23.
- [3] 乔建平. 滑坡减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [4] 吴积善, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [5] 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析[C]. 成都: 四川科学出版社, 1990.
- [6] 谭万沛, 等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测预报——以攀西地区为例[M]. 成都: 四川科学出版社, 1994.
- [7] 李焯芬, 陈虹. 雨水渗透与香港滑坡灾害[J]. 水文地质与工程地质, 1997, (4): 34~38.
- [8] 王裕宜. 泥石流侵蚀过程中应力特征的分析研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(2): 12~19.